

TK 155.594

KFKI-1984-12

EGELI GY.

KRITIKUS KIÖMLÉSI MODELLEK
ÉS A GÖZ-SZEPARÁCIÓ PROBLÉMÁI

Hungarian Academy of Sciences

CENTRAL
RESEARCH
INSTITUTE FOR
PHYSICS

BUDAPEST

2017

KRITIKUS KIÖMLÉSI MODELLEK
ÉS A GŐZ-SZEPARÁCIÓ PROBLÉMÁI

EGELI GY.

Központi Fizikai Kutató Intézet
1525 Budapest 114, Pf. 49

A dolgozat az OKKFT A/11-2. alprogram 2.1.6 feladatának
teljesítéséről készített kutatási jelentés

Bevezetés

Ez a kutatási jelentés két olyan témát vizsgál, amelyek alapvető jelentőségűek a reaktorbiztonsági számításokban. Először a kritikus kiömlési modellek kerülnek ismertetésre, majd a folyadék és gőzének szeparálódását leíró modell.

Az első rész mind a kis, mind a nagy átmérőjű csőtöréssel kapcsolatos üzemzavar esetében lényeges, míg a szeparáció ismerete főleg a kis törések esetén lényeges.

Az intenzív kutatómunka ellenére a fenti folyamatok teljesen megbízható modellezése ma még nem lehetséges. Ez annak a következménye, hogy mindkét esetben nagyon bonyolult áramlási viszonyok alakulnak ki, amelyek jelenlegi ismereteink alapján nem kezelhetők. Létrejöttek azonban olyan, a műszaki gyakorlatban használható korrelációk, amelyek mérési eredményekre támaszkodva, a fenti esetek viszonylag jó közelítését adják. Ezek a modellek és korrelációk - számítógépi modellbe építve - az erőműben lejátszódó folyamatok szimulációját lehetővé teszik.

Igen gondosan kell azonban ügyelni arra, hogy melyik összefüggést milyen határok között alkalmazzuk. A jelentés célja az, hogy segítse az eligazodást, s a fenti jelenségek fizikájának megértését.

Reaktorbalesetek áramlási problémái

A nyomottvizes reaktorok üzemzavari leírása lényeges feladat egy erőmű tervezése, engedélyezése és üzemeltetése esetén. A tervezőknek a biztonsági berendezéseket ennek megfelelően kell létrehozni és méretezni, az engedélyezők ez alapján döntenek a működésről és a szükséges intézkedési tervekről, az üzemben tartó operátorok pedig egy üzemzavar fellépése esetén a tanultak alapján a megfelelő lépéseket megtehetik.

A kereskedelmi, erőművi reaktorok megjelenése óta foglalkoztatja a kutatókat a csőtöréses balesettel járó problémák sora, de mindenneklőtt a törési felületen kilépő tömegfluxus. A folyadékmechanikában addig perifériális kétfázisú áramlás tanulmányozása került az előtérbe. Az addigi, az egyfázisú áramlásoknál megismert hasonlósági módszerek minden próbálkozás ellenére nem vezettek sikerre, egy új formalizmust kellett megalkotni.

Először a gőz és folyadék keverékének áramlását két megmaradási egyenlettel próbálták leírni, majd ezt hamarosan követte az ugynevezett "homogén modell", amely ezt a keveréket mint egy homogén elegyet írta le, a szükséges 3 megmaradási egyenlettel. /Ezek a tömeg, impulzus és energia megmaradása./

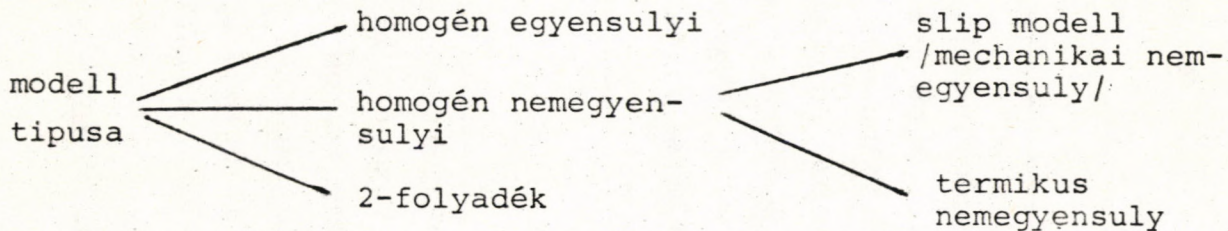
Az alábbiakban a biztonsági kódokban szereplő főbb fizikai modelleket ismertetjük, ezen belül is főleg a homogén modelleket.

A fejlettebb, ún. "két folyadék" modelleket csak nagyon vázlatosan mutatjuk be.

Amennyiben a folyadék és gőzfázis között eltérő sebességet engedünk meg, s ezt a sebességkülönbséget egy korrelációval meg tudjuk adni, akkor az ún. "slip" modellhez jutunk. Ennek nyilvánvaló előnye az, hogy a tömegfluxust pontosabban tudja számolni, persze emiatt valamivel bonyolultabb is lesz az egész.

A kísérletek során kiderült, hogy különösen rövid csövek esetén, a mért és a homogén modellel számított értékek között nagy az eltérés. Korán kiderült, hogy ennek oka az, hogy míg a valóságban egy kis idő szükséges az elpárolgáshoz, a homogén modell ezt nem tudja figyelembe venni. Az ún. "termikus nemegyensúly" egy újabb probléma tehát, s leírására több modell is született. Itt különböző korrelációk vagy fizi-

kai megfontolások születtek arra, hogy a gyors párolgás alatt a két fázis közti hőmérsékletkülönbséget le tudják írni. A fentiek szerint tehát a jelenleg használt biztonsági kódok a következő fizikai modellekre épülnek:



Az említetteken kívül más lényeges szempontok is vannak persze. Ilyen pl. hogy egy adott program képes-e

- a/ tranziens jelenségek leírására /ez a reaktorbaleseteknél alapvető követelmény/
- b/ többdimenziós hatások leírására /ez nem alapvetően szükséges, de segíti a leírást a reaktortartályban, míg a csöveknél az egydimenziós modellek is megfelelőek/
- c/ folyadékszeparáció a nyomástartó edényekben /kis törések esetén alapvető fontossága a mindenkori folyadékszint ismerete/
- d/ környezettel való hőcsere /a fűtőelemek és a hőcserélő modellezésekor lényeges/
- e/ áramlási csatorna alakja /tud-e modellezni rövid fuvókákat, változó keresztmetszetű csöveket és vezetékeket/.

A következőkben egy táblázatban adjuk meg a különböző fizikai modellek leglényegesebb jellemzőit; az alapvető fizikai modelljét, megoldáshoz használt módszert, az elérhető eredményeket, főbb konkluziókat, a szerző/k/ nevét és a modell keletkezési idejét.

van-e		Szerző neve, keletkezési idő	A modell fő jellemzői	Megjegyzés
termikus egyensúly	mechanikai egyensúly /slip/			
igen	igen		Homogén egyensúlyi modell Izentróp áramlás	Ez a legegyszerűbb kétfázisú áramlási modell, nagyon sok programban /pl. RELAP/ felhasználják.
"	"	Babitsky, 1973.	Egyensúlyi modell	A momentum egyensúlyi egyenletet izentróp feltétellel helyettesíti
"	nem	Moody, 1965.	Slip egyensúlyi modell /energia modell/	Ez az egyik leggyakrabban használt fizikai modell, jelenleg a RELAP-ben is ez van
"	nem	Moody, 1966.	A teljes lefuvatási jelenség modellezése, az összes áram- lási rezsimmépre	
"	nem	Levy, 1965.	Átlagolt /lumped/ modell	A "X" gőztartalom és " " térfogattest /void/ között a kapcsolatot úgy adja meg, hogy azonos nyomásvesztést té- telez fel mindkét fázisra
"	nem	Cruver, 1967.	Egydimenziós, szeparált, izentróp egyensúlyi modell	Egy olyan átlagolt, kétfázisú fajtér- fogatot definiálnak és vezetnek be, amelyik, a különböző fizikai mennyisé- gek figyelembevételével számolható
"	nem	Malnes, 1977.	A szerző rávilágít arra az el- térésre, amit a "frozen flow" és egyensúlyi áramlás feltéte- lezése azaz a maximális tömeg- fluxusra	

van-e		Szerző neve, keletkezési idő	A modell fő jellemzői	Megjegyzés
termikus egyensúly	mechanikai egyensúly /slip/			
igen	nem	Adachi, 1973	Két független energiaegyenlet a folyadék és gőzfázisra	Ez a modell a 2 energiaegyenlet miatt eltér az eddigiektől
"	"	Adachi, 1974.	- " -	A kontrakciós együttható c_d tanul- mányozása
"	"	Moody, 1975.	Konzisztens slip modell	
"	"	Castiglia, 1979.	A teljes expanzió során maximális entrópiájú kiömlést tételez fel	Az eredmények hasonlóak Moody 1965- ös eredményéhez
"	"	Tentner, 1978.	Karakterisztikák módszerét használ- ják a megoldáshoz	Egy "variálható" idő jelenik meg az egyenletekben. Csak egyszerű geomet- riára érvényes
"	"	Wallis, 1978.	Izentróp "gőz cső" modell	A szerzők kikerülik a slip számításá- val kapcsolatos problémákat
"	"	Ransom, 1978.	Karakterisztikák módszere	A RELAP 5 0 verziójában használatos
"	"frozen" modellek	Burnell, 1974.	Félempirikus korreláció, amely az aláhűtött tartományban érvényes	Használata egyszerű
"		Starkman, 1964.	Kasszikus "frozen" modell./A "frozen" olyan értelemben szerepel, hogy a fá- zisok között nincs tömeg és energia- csere/	A szerzők saját kísérleti eredményein alapul

van-e		Szerző neve, keletkezési idő	A modell fő jellemzői	Megjegyzés
termikus egyensúly	mechanikus egyensúly /slip/			
nem	"frozen" modellek	Henry, 1971.	A modell célja, hogy a kritikus tömeg- fluxust úgy számolja, hogy a termikus nem-egyensúly számolására elég legyen a kezdeti, nyugalmi állapotthatározók ismerete	Jelenleg a RELAP egyik opciója
"	általános elméletek	Henry, 1970.	Alacsony gőztartalmakra érvényes mo- dell / $x < 0,02$ /	A metastabil /hővezetési/ effektu- sokat figyelembe vevő egyszerű modell
"		Henry, 1970.	A modell $L/D < 12$ tartományra érvényes. /L a vezeték hossza, D az átmérője/	A szerző a kétfázisu áramlás tu- lajdonságait a vezeték kezdetének keresztmetszetváltozására vezeti vissza./Lekerekített és éles átme- net esetén más lesz a folyamat képe/
"		Henry, 1970.	A modell $L/D > 12$ érvényes.	

van-e		Szerző neve, keletkezési idő	A modell fő jellemzői	Megjegyzés
termikus egyensúly	mechanikus egyensúly /slip/			
nem	Általános modellek	Malnes, 1975.	Az oldott gázok kiválásának figyelembevétele	
"		Porter, 1975.	Moody modell szolgál refe- renciaként	Mollier diagram segítségével végzett analízis, aláhűtött tartománytól túl- hevitett gőzig
"		Rirard, 1975.	Kétfolyadék, kétfázisu modell	A teljes lefuvatás analízise
"		Kroeger, 1976.	Drift fluxus modell	Analitikusan konzisztens elmélet
"		Tentner, 1978.	Karakterisztikák módszere	Moody eredményeivel ellentmondó vég- eredmény
"		Moesinger, 1978.	Drift fluxus közelítés	A teljes lefuvatási folyamat modellezése
"		Winters, 1979.	Átlagolt nem-egyensúlyi modell, amely a buboréknövekedésen a- lapul	Két empirikus együtthatót használ
"		Flinta, 1975.	A buboréknukleáció hatása a kritikus tömegfluxusra	
"		Bauer, 1975.	Nem-egyensúlyi modell	Elméletileg levezetett pseudokritikus modell
"		Stadtke, 1977.	Irreverzibilis termodinamikai analízis	A fázisok közti cseretagok elemzése a kritikus kiáramlás szempontjából
"		Seynhaeve, 1977.	Fuvókán kiáramló folyadék ana- lízise	

A modellek tulajdonságainak vizsgálata.

Termodinamikai egyensulyon alapuló modellek

Az ebbe a kategóriába tartozó modellek alapvető feltételezése, hogy a folyadék és gőzfázis között az áramlási keresztmetszet bármely pontján termodinamikai egyensuly van, azaz:

- a két fázis nyomása és hőmérséklete azonos,
- a nyomást és a hőmérsékletet a Mollier diagram telítési görbéjével egymásnak megfeleltetjük.

A keverék gőztartalma változhat a vezeték mentén. Elvileg ez ellentmondásban van a fenti hipotézissel, mert a párolgás vagy kondenzálódás a fázisok közti hőmérséklet és nyomáskülönbségtől függ. Itt hallgatólagosan fel kell tételezni, hogy a változások végtelen gyorsan történnek.

A homogén modellek tovább osztályozhatók, aszerint, hogy feltételezünk-e a fázisok között sebességkülönbséget, vagy nem. Az alábbi esetben még legalább egy állapotegyenlet szükséges a megoldáshoz. Gyakran ez az egyenlet az alapvető eltérés az egyes modellek között.

Továbbá, a legtöbb modell stacioner, izentróp kiáramlást tételez fel. LOCA esetén, ha nagy a csőátmérő, a stacioner feltevés nem helytálló, kistörés esetén pedig az izentróp közelítés.

Nemegyensulyi modellek

A nemegyensulyi feltételt a következők miatt kell bevezetni:

- A kétfázisu közeg lefuvatásánál a nyomáscsökkenés sebességének értéke nagyobb lehet, mint amit a fázisok közti termikus csere követni tud.
- A falakkal való energia /hő/ és momentum /surlódás/ átadás, kölcsönhatás miatt.

A kísérleti eredmények tanulsága szerint kb. 1 millisekundum ideig marad metastabil állapotban, ami maximális sebesség esetén 12 centiméteres ut és vezetékhozzát jelent. /Moody/

Más forrásokból viszont az derül ki, hogy az L/D hányados a döntő, $1/D < 1/4$ esetén a jelenséget minden esetre figyelembe kell venni.

Hosszu csövek esetén is, a törési, kiáramlási keresztmetszetben is figyelembe kell venni a hatását. A jelenség hatása abban nyilvánul meg, hogy megnövekszik a kritikus tömegfluxus, és az áramlási sebesség.

Nagyon sok nem-egyensúlyi teória született: néhány közülük nem több, mint empirikus formula, mások nagyon alaposan írják le a jelenséget.

A legtöbb esetben szükség van empirikus együttatókra; többek között a nukleációs magok sűrűségére térfogategységenként, áramlásösszehúzódási tényezőre stb. Ezeket a tényezőket kísérleti eredmények felhasználásával nyerik.

A nemegyensúlyi modellek tovább csoportosíthatók. Az ún. "frozen" modellek feltevései általában a következők:

- a két fázis közti sebesség aránya adott
- a fázisok között nincs hő- és tömegátadás /ezért kapta a "frozen" /fagyott/ nevet, mert így a gőztartalom nem változik az áramlás mentén.
- a gőz egy megadott törvény szerint változik, pl. tökéletes gázként.
- az egyes fázisokban végbement változások egymástól függetlenek.

A kísérleti eredmények szerint, ez a modell akkor ad jó eredményeket, ha az áramlás tranzitideje kevesebb, mint amíg a metastabil állapot tart. Ezt persze nem könnyű meghatározni, mert a gőz/folyadék felszín nagyban befolyásolja az értékét. Ehhez pedig tudni kell a nukleációs magvak számát és eloszlását.

A RELAP 4-ben felhasznált modellek

Az egyes csomópontokban a következő modellek számíthatják a kritikus tömegfluxust.

- hangsebességen alapuló kritikus modell
- Moody /1965/ modell
- Henry Fauske modell - 1971
- Homogén Egyensúlyi Modell /HEM/

A program minden egyes csomópontra a felhasználó által előírt modellel és az inerciális modellel is kiszámítja a tömegfluxust - és a kisebbik értéket használja fel az adott helyen.

Most ezek a modellek kerülnek rövid ismertetésre.

Hangsebességen alapuló modell /Sonic/

Az áramló közeget minden szempontból homogénnek kell tekinteni, feltéve, hogy az egyfázisú közegeknél felhasznált hangsebességi formulát használjuk:

$$a^2 = \frac{dP}{d\rho} \Big|_{s=all}$$

A bemenő adatok az előző térfogatelem állapotváltozói; a fajlagos belső energia és fajlagos térfogat. A tömegfluxust a kontinuitási egyenletből kapjuk $W = \rho_m a A$. A csomópontban a ρ_m sűrűséget először a megelőző térfogatelem sűrűségével megegyezőnek tételezzük fel, majd a surlódás és kinetikus energiaváltozás figyelembevételével módosítjuk. Ezután a keverék izentrópicusan expandál az előző térfogatelem Mach számáról az adott elem Mach számának megfelelő segességre.

Elvileg lehetőség van arra, hogy ezzel a modellel leírjuk a folyadékban oldott gáz viselkedését kiválásakor, tökéletes gázt feltéve.

Moody Modell

Ez egy egydimenziós, termikus egyensúlyi modell. Hosszu ideig ez a modell volt a legáltalánosabban elterjedt, és $L/D \gg 1$ esetre jó eredményeket ad.

A modell a következő feltételeket tartalmazza:

- azonos axiális sebesség mindkét fázisra egy adott keresztmetszetben,
- izentrop állapotváltozás - nincs surlódás a fázisok között és a falon,
- stacioner áramlás.

A modell egy kontinuitási és egy energiamegmaradási egyenletet tartalmaz. Ezek kombinációjából, és a keverék entrópiájának, entalpiájának, fajtérfogatának és slippjének definíciójából a tömegfluxus számítható a slip és nyomás függvényeként. Feltételezi, hogy a kritikus tömegfluxus a maximális slip értékénél fog bekövetkezni, így

$$W_{crit} = \max f(p, x)$$

a kritikus tömegfluxus az előző térfogatelem adatainak ismeretéből számítható.

Henry Fauske Modell

Ennek a modellnek a célja, hogy a kétfázisú kritikus tömegfluxust a nyugalmi állapotjelzőkből vezesse le, és ugyanakkor nemegyensúlyi jelenségeket is figyelembe tudjon venni.

A csővezeték Laval fuvókaként kezeli.

Itt a tömeg és impulzusmegmaradást felírva, a surlódási tagot a gyorsítási taghoz képest elhanyagolhatónak tételezi fel. További feltételezések:

- a kritikus kiáramlás független a torok nyomásától,
- a gőztartalom állandó a torokig,
- a folyadék hőmérséklete, a gőz és folyadék entrópiája a toroknál azonos az eredeti nyugalmi értékkel,
- a slip értéke 1, azaz $U_g/U_e = 1$.
- a gőz a torokban politropikus expanzióval tágul,
- a torokban a következő összefüggések teljesülnek

$$\frac{ds}{dp}/t = 0 ; \quad \text{és} \quad \frac{dx}{dp}/t = \phi \left(\frac{dx_e}{dp} \right) / t$$

ahol X_e az egyensúlyi gőztartalom és ϕ egy empirikusan meghatározott függvény.

A fenti egyenletek és feltevések kombinálásával adódik egy olyan összefüggés, amely a tömegfluxust leírja. Megjegyzendő, hogy a modell alacsony gőztartalmak esetén érvényes, és a "frozen" és egyensúlyi modell között vannak az értékei.

A szerzők a kritikus kiáramlás esetére 0.84-es kontrakciós együtthatót javasolnak, rövid csövek esetére.

Homogén Egyensúlyi Modell

Mint a már tárgyalt hangsebességi modellnél, a fázisok közti egyensúly teljes. Ez a lehető legegyszerűbb modell. Eredetileg arra az esetre fejlesztették ki, mikor a tartály térfogata a kiáramló mennyiséghez képest végtelennek volt tekinthető.

Elemzés

A RELAP-ben bármely modell használható a fentiek közül. Leggyakrabban a Henry Fauske modellt és a HEM modellt használják, az előbbi 0.01-0.02 gőztartalom értékig, onnan a HEM modellt.

Az inerciális modell adja a leggyorsabb lefuvatási sebességet, és a legmagasabb tömegfluxust aláhűtött esetre. A modellek többsége /és kombinációjuk/ az inerciális modell kivételével nagyjából azonos mennyiségű lefuvatást eredményez.

A fő eltérés a fajlagos tömegfluxus-gőztartalom sikon jelentkezik; néhány modell aláhűtött esetre ad nagyobb tömegfluxust, míg másokra a fordítottja a jellemző.

A következő megjegyzések lényegesek még:

A kezelési utasítás nem ad utbaigazítást a modellek alkalmazhatósági tartományáról. A lényeges egyszerűsítési feltételeken felül nem ad leírást a tömegfluxus, a surlódás és keverék átlagolásra vonatkozóan. A modellek kombinálása fizikailag nem nagyon indokolható; jobban lehet vele egyes méréseket közelíteni, de ugyanakkor növelheti a számított eredmények szórását, csökkentve ezáltal az új helyzetek leírásának lehetőségét.

Lényeges lenne, hogy a továbbiakban csökkentsék a felhasználók rendelkezésére álló opciók számát, ugyanakkor az adott modellekkel kapcsolatban mélyebb és egyértelműbb információt szolgáltatassanak a kód írói, hogy a valóságos esetekre minél biztonságosabban fel lehessen használni a programot.

A modellek összehasonlítása

1. Valószínűleg nincs még egy olyan műszaki probléma, aminél egyazon feladatra ilyen sok eltérő megoldási módszer lenne /a kritikus tömegfluxus számítására/.
2. A fizikai modell egyértelműsége, ellentmondásmentessége erősen változik modellenként.
3. Nagyon kevés szerző adja közre úgy az eredményeit, hogy azt másokkal össze lehetne vetni. Nincs is tulajdonképpen ilyen általánosan elfogadott módszer. Ilyen lehetne pl. a fajlagos tömegfluxus a nyugalmi nyomás és entalpia függvényében, vagy az egyensúlyi nyomás és gőztartalom függvényében.

4. Az egyes fizikai modellek megoldására szolgáló matematikai módszerek száma is nagy, majdnem megegyezik a fizikai modellek számával.
5. A legtöbb modellnél hiányzik a tömegfluxus explicit kifejezése.
6. Az eltérések olyan mértékűek az egyes modellek között, hogy nehéz az összehasonlítás. Nem lehet megtenni pl., hogy egy teljesen általános modellből kiindulva, a megfelelő egyszerűsítések után az egyes specifikus modelleket megkapjuk.

A felsoroltakból látható, hogy milyen problémákkal jár a modellek összehasonlítása. Mivel egy-egy modell csak bizonyos paraméterek között érvényes, így a teljes tartományban való összehasonlítás nem is lenne értelmes. Mindezek ellenére, ahol az érvényességi tartományban átfedések vannak, ott kimutathatók az eltérések, s a következő részben ezek bemutatására kerül sor.

Kvantitatív összehasonlítás

Néhány modell eredménye elfogadhatatlan, ami az összehasonlításból kitűnik /lásd az ábrákat/.

A leglényegesebb eltérések a termikus nemegyensúly fellépéseként az alacsony gőztartalom, rövid csőben történő áramlásnál jelennek meg.
 $L/D < 8$

Néhány modell nagyon különböző eredményt ad, ha egy olyan paramétert változtatunk, ami nincs nagyon pontosan definiálva. Ilyen pl. a 4. ábrán látható eset, amikor a slip értékét másképp definiálják, ezért jelentős az eltérés közöttük.

Az összehasonlítás különösen nehéz a legfejlettebb "két-folyadék" modelleknél, a paraméterek jelentős száma miatt.

Néhány olyan eredményt is bemutatunk, amely a teljes primerkört a LOCA folyamán leírja, s mérési és számítási eredményeket össze lehet hasonlítani. A folyamatos vonalak a kísérleti eredményeket reprezentálják az idő függvényében, a pontozott vonalak a RELAP 4/Mod 2 eredményeit mutatják, melyek a Moody modellt használják, míg a szaggatott vonalat a RELAP4/Mod 5 adja, ahol a Henry-Fauske-HEM modell kombinációját használták. Látható a tömegfluxusban jelentkező lényeges különbség, de az is, hogy a nyomásváltozás tendenciája azért a konkrét modellektől független.

Hozzá kell tenni, hogy ebben az összehasonlításban nemcsak a modellek játszanak szerepet, mert azok csak a tranziens elején meghatározó jellegűek, hanem a numerikus megoldás is, azaz hány térfogatelemet használunk fel a számításokhoz.

Néhány szerző megjegyzése a modell használhatóságáról

Moody /1975/

Tartályon levő rövid fuvókán keresztül történő lefuvatásról:

A kilépési helyen vett nyomás és gőztartalom függvényében számolt tömegfluxus jóval nagyobb értéket ad, mintha ugyanezeket a paramétereket a tartályban adnánk meg. Kimutatható, hogy ez az áramlási kép megváltozásának következménye.

Malnes /1975/

A kétdimenziós effektusok következményeként nem kapunk valódi kritikus állapotot egydimenziós modellel. A kritikus tömegfluxus ennek ellenére számolható az egydimenziós kontinuitási egyenlet segítségével, ha megfelelő flashing /elpárolgási/ korrelációt használunk, mivel a tömegfluxus nem érzékeny a környezeti paraméterekre /miután a kritikus állapot beállt/. A folyadék gáztartalma fontos paraméter a kritikus tömegfluxus meghatározásánál.

Adron /1976/

Nincs egy olyan általánosan használható modell, amely a kísérleteknél megfigyelhető kétdimenziós effektusokat le tudná írni, és így a számításokat megbízhatóvá tenné.

Boure /1976/

A kétfázisu áramlásoknál - mivel a keverékben végbemenő változások a falon és a fázishatáron végbemenő transzportjelenségek függvényei - fontosabb lenne a transzporttörvényeket definiálni, mint a keverék változását leírni.

A transzporttörvények matematikai alakja döntő fontosságu, és a független változók parciális deriváltjait tartalmazniuk kell.

Travis /1979/

Az új gőzkeletkezési modell a kísérleti adatokkal való összevetés során bebizonyította, hogy képes a jelenség leírására.

Wallis /1979/

A HEM hosszú csövek esetén jó közelítést ad, mert ekkor elegendő idő áll rendelkezésre a termikus egyensúly elérésére. Rövid csövekre a hiba nagy lehet /5-ös faktor/ és észrevehető /2-es faktor/, ha gyűrűs áramlás esetén nagy a relatív sebesség.

Bár az egyes szerzők eltérő feltételezésekkel élnek a buborékok keletkezését illetően, alapvetően egyik sincs meg empirizmus nélkül. Vagy eleve így adják meg, vagy a levezetésnél van valahol elrejtve. Az összefüggéseket inkább úgy választják meg, hogy a kapott tömegfluxus-értékeket visszaadják, mintsem hogy a mért nukleációs eredményekből indulnának ki. Ezért az eredmények javulását rontja az a tény, hogy csak specifikus esetre használhatók.

Boure /1978/

A kritikus kiömlést kvalitatív módon már jól leírjuk, értjük. Akkor kritikus egy áramlás, amikor a kritikus keresztmetszetben az áramlási sebesség megegyezik a befelé terjedő zavarás sebességével. Ahhoz, hogy a kritikus áramlást még jobban leírassuk, a következő területen van még tennivaló: nukleáció, transzfertörvények, melyek nagy gradiensek esetén szabályozzák az áramlást, topológiai törvények, amelyek a fázisok közti felületet adják meg, hullámterjedési jelenségek, két és háromdimenziós hatások, a "pszeudo"-kritikusság elérésének feltételei.

ÖSSZEFOGLALÁS

Az eltérő modellek és megoldási módszerek néha jelentős különbséget adnak a kritikus kétfázisu áramlás számításában.

A szerzők többsége jó egyezést mutat ki a modelljük és az általuk kiválasztott adatok között.

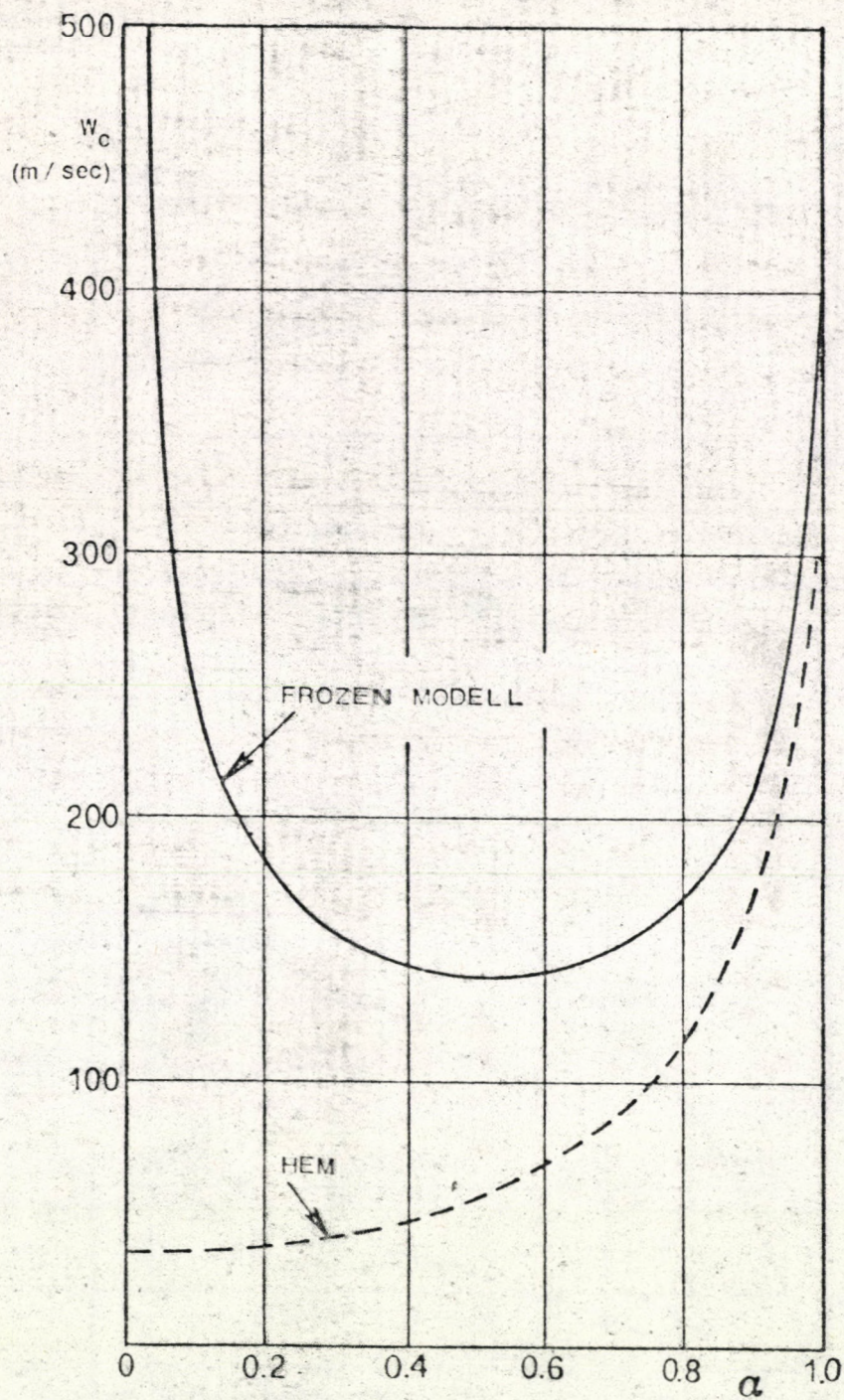
Az új modellek kifejlesztésénél ritkán veszik figyelembe a már meglevő modelleket, ezért egy egységes kutatási irány nem figyelhető meg; inkább az, hogy eléggé eltérő módon közelítik meg a problémát.

A modellek eltérőségének az oka a jelenség összetettségében keresendő, és a megbízható kísérleti eredmények hiányának. Az utóbbi négy évben jelentek meg a fejlett, két-folyadék modellek, ahol a problémát fizikailag a transzfertörvények megismerése jelenti. Itt világosan

elkülöníthető két trend:

- a/ a meglevő mérési eredmények felhasználásával korrelációk felállítás,
- b/ a jelenség fizikájának mély megismerése és leírása, empirikus együtthatók nélkül. A kritikusság itt a modellben implicit módon van benne.

A fejlődés azt mutatja, hogy a két-folyadék modellek kerülnek előtérbe, és mindkét /a,b/ megközelítésre szükség van.

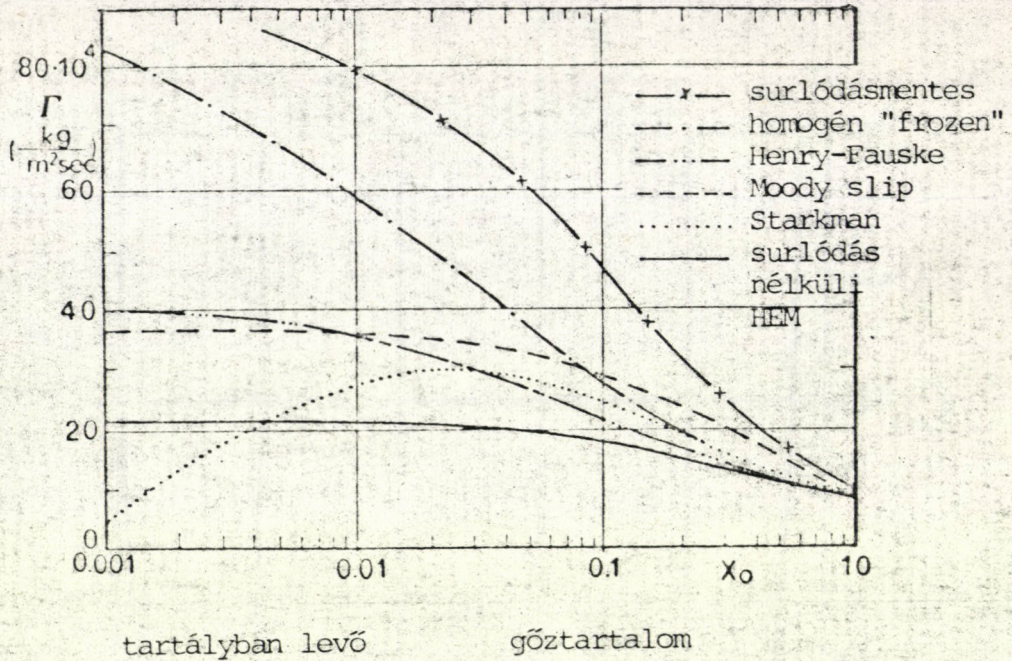


1. ábra

A kritikus sebességek a "frozen" és homogén egyensúlyi modell esetén

/p₀= 62 bar/

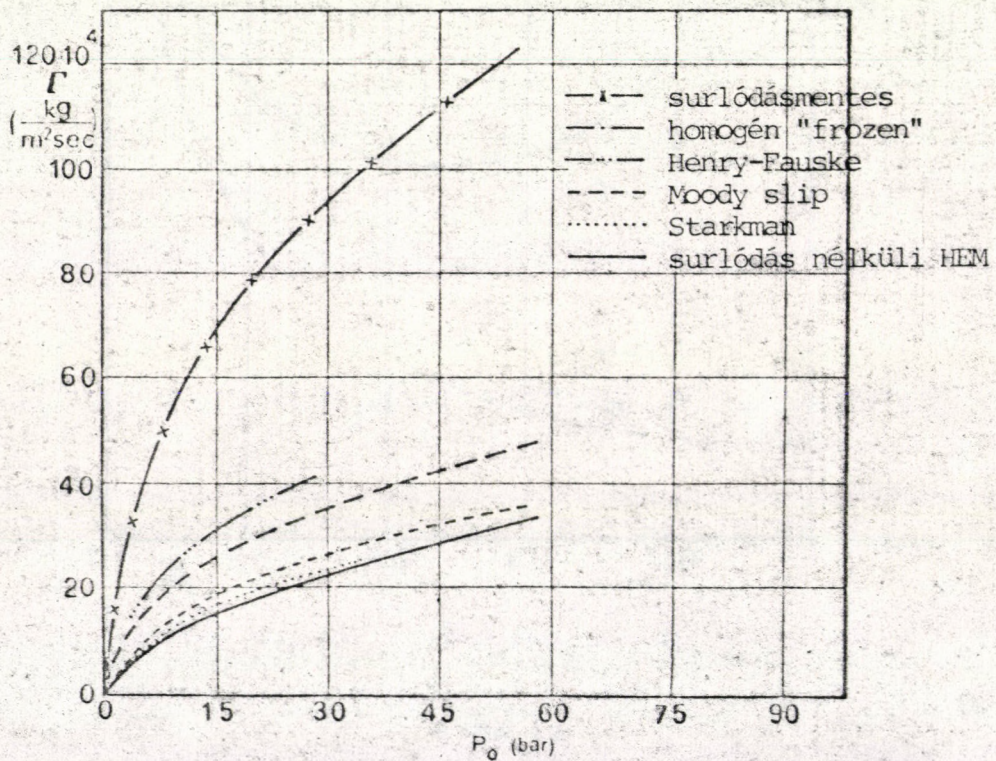
fajlagos
tömegfluxus



tartályban levő gőztartalom

Különböző kiömlési modellek összehasonlítása

fajlagos
tömegfluxus

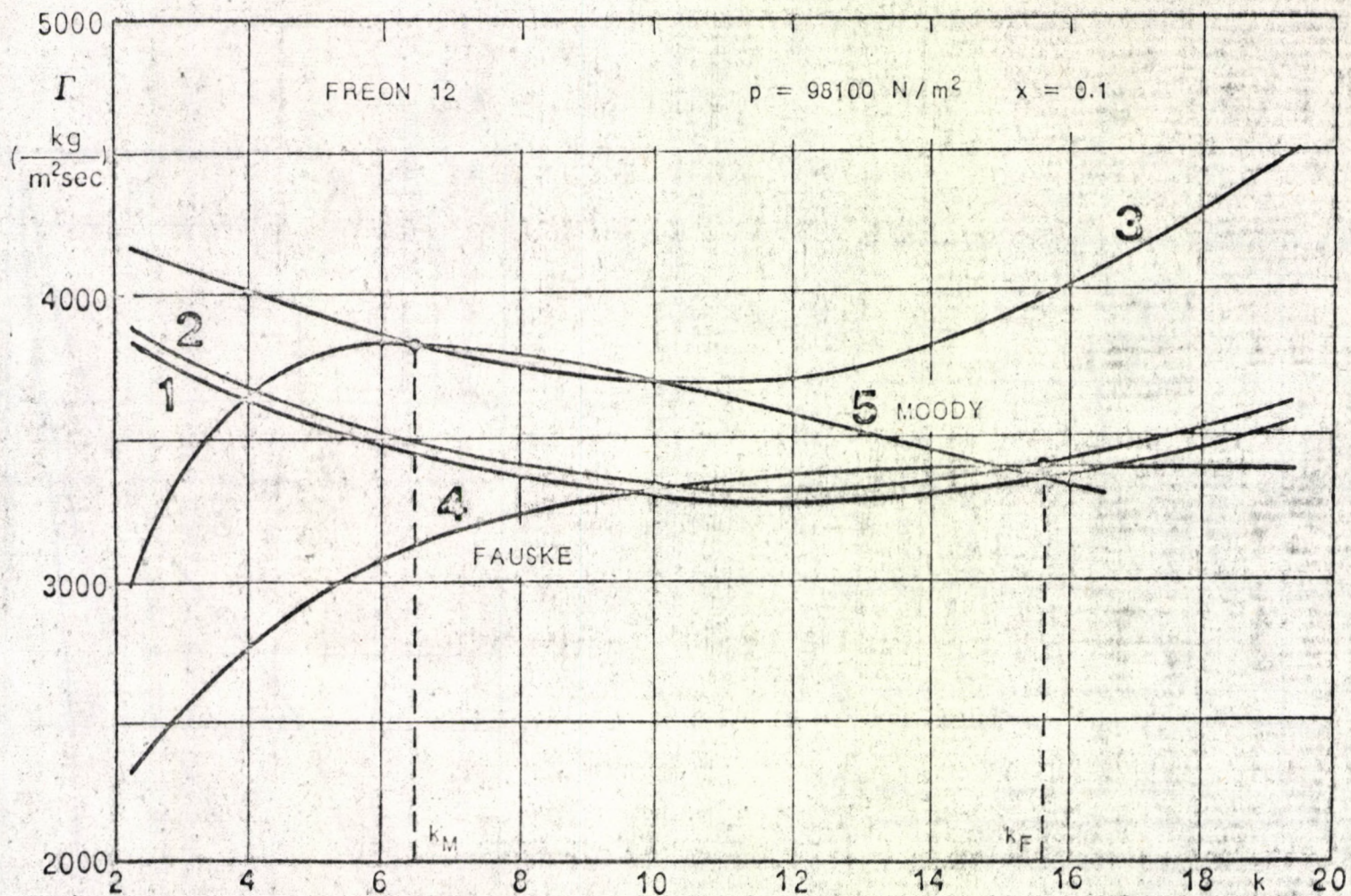


nyomás a tartályban

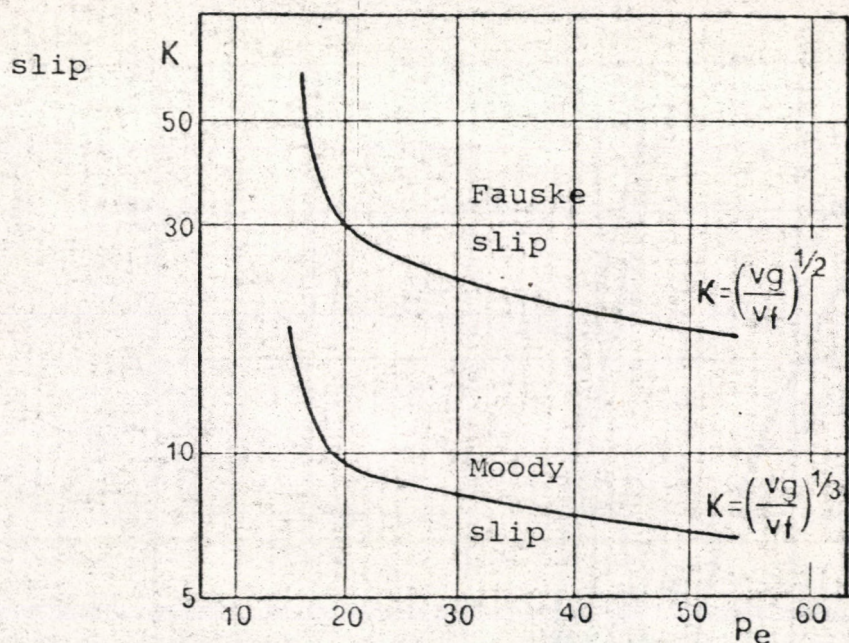
Telített folyadék lefuvatása

fajlagos
tömeg-
fluxus

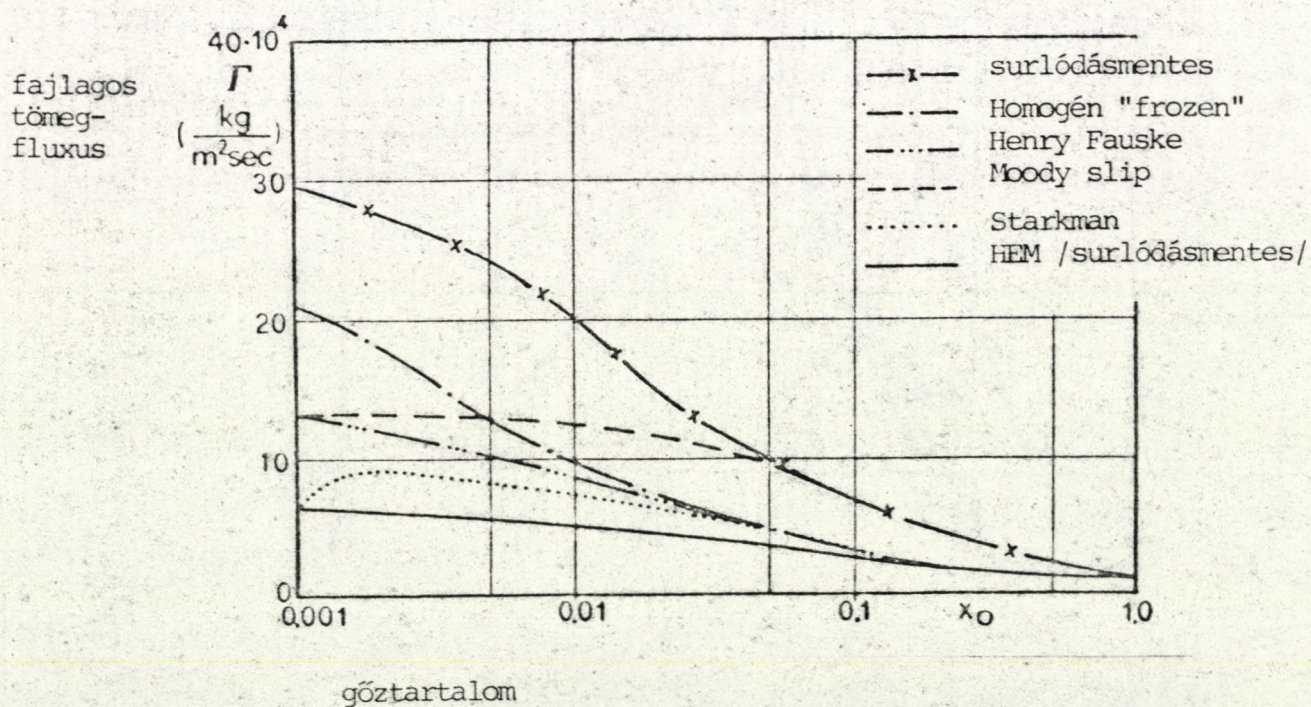
3. ábra



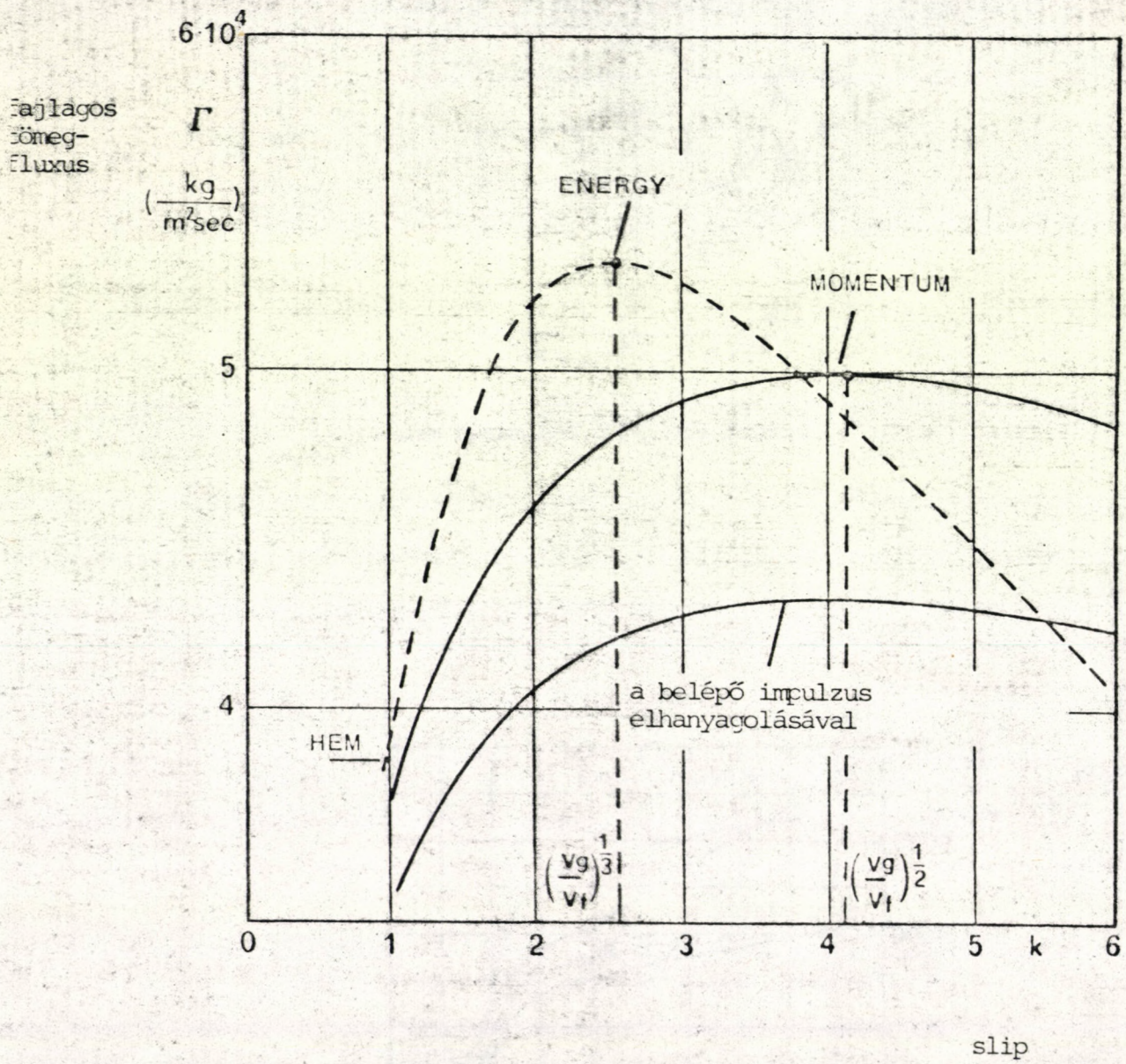
slip



A Moody és Fauske modell slipjének összehasonlítása
a kilépő nyomás függvényében

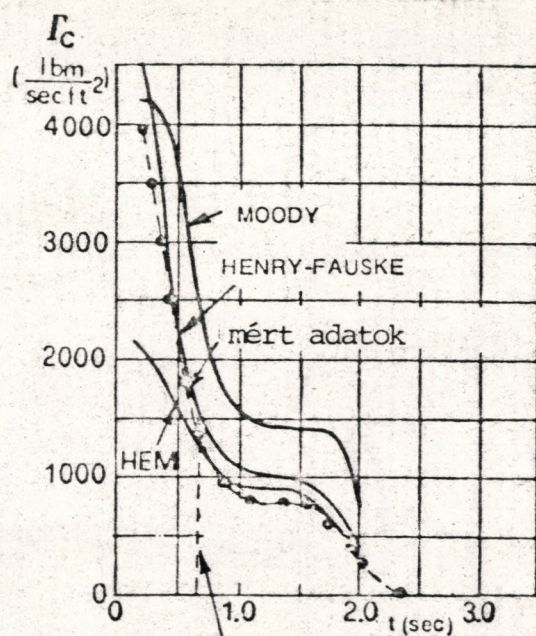


Kritikus kiömlési modellek összehasonlítása $/p_0 = 6.9 \text{ bar}/$



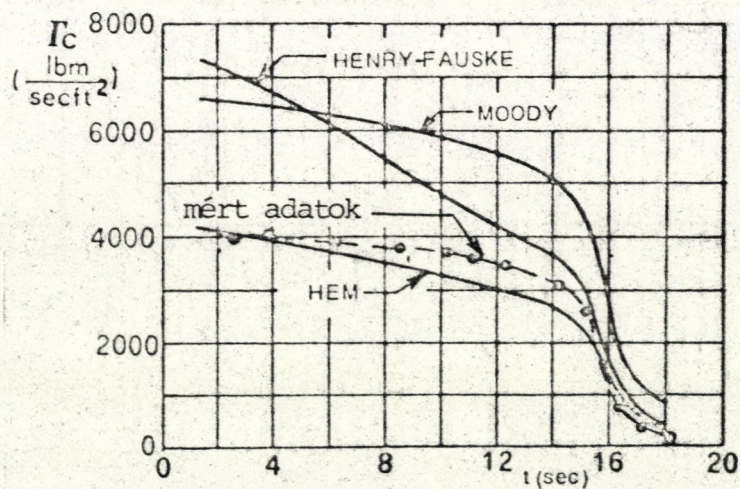
5. ábra

fajlagos
tömegfluxus



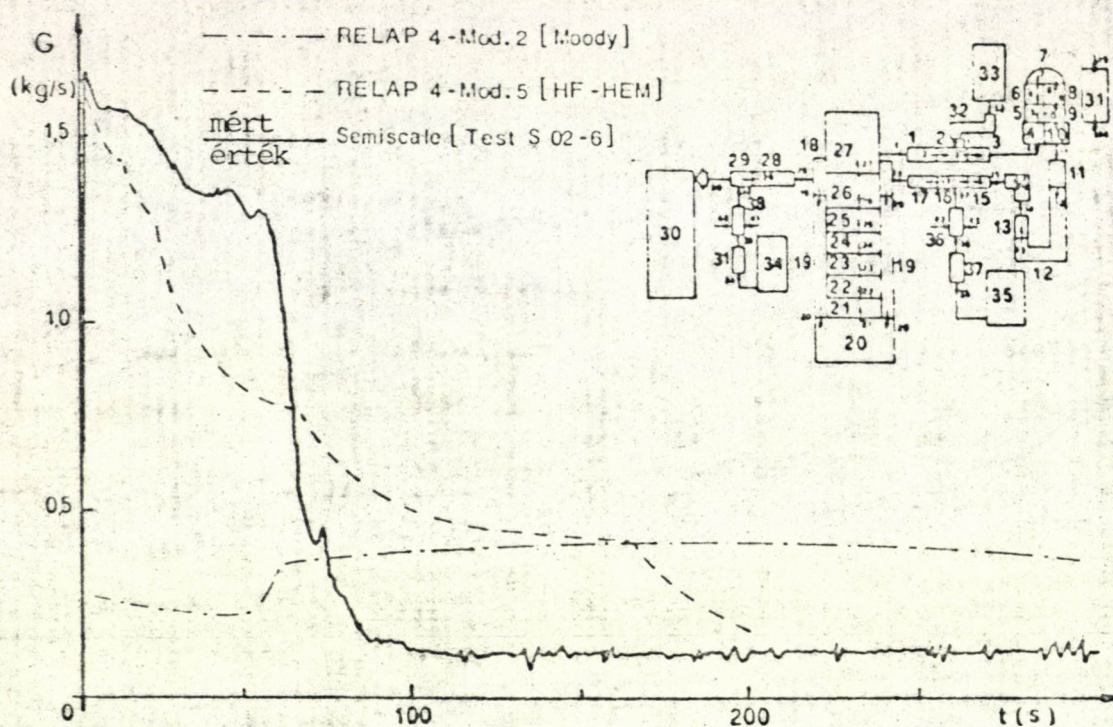
a kezdeti tömeg 38 %-a marad meg

fajlagos
tömegfluxus

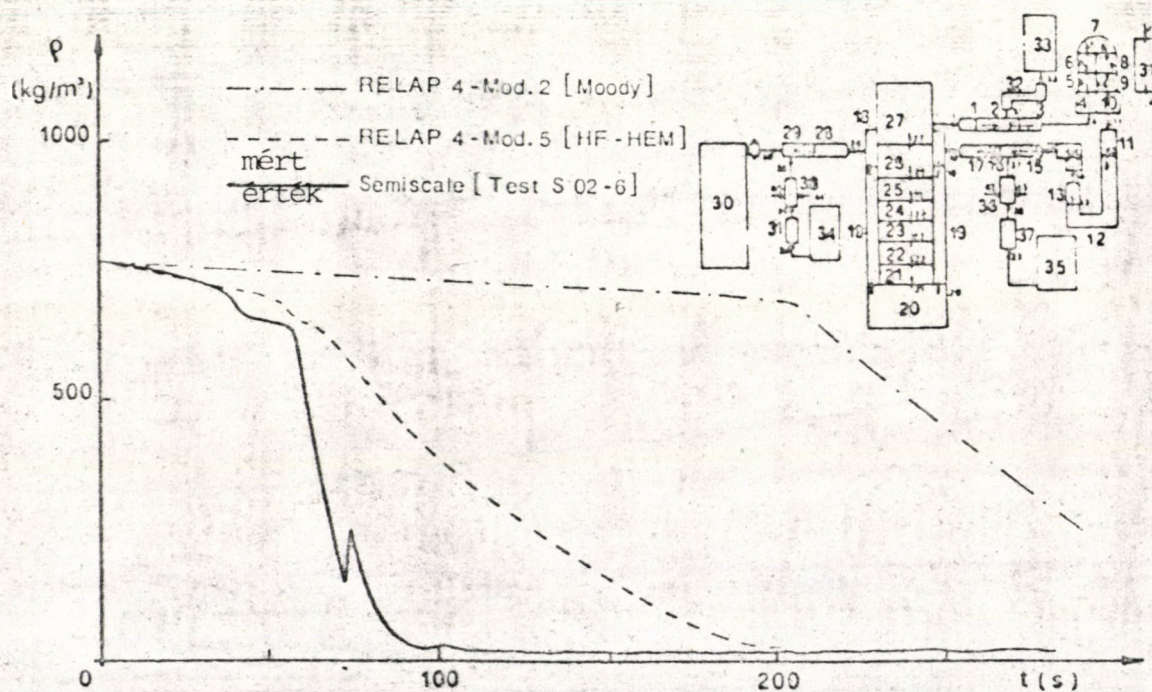


6. ábra

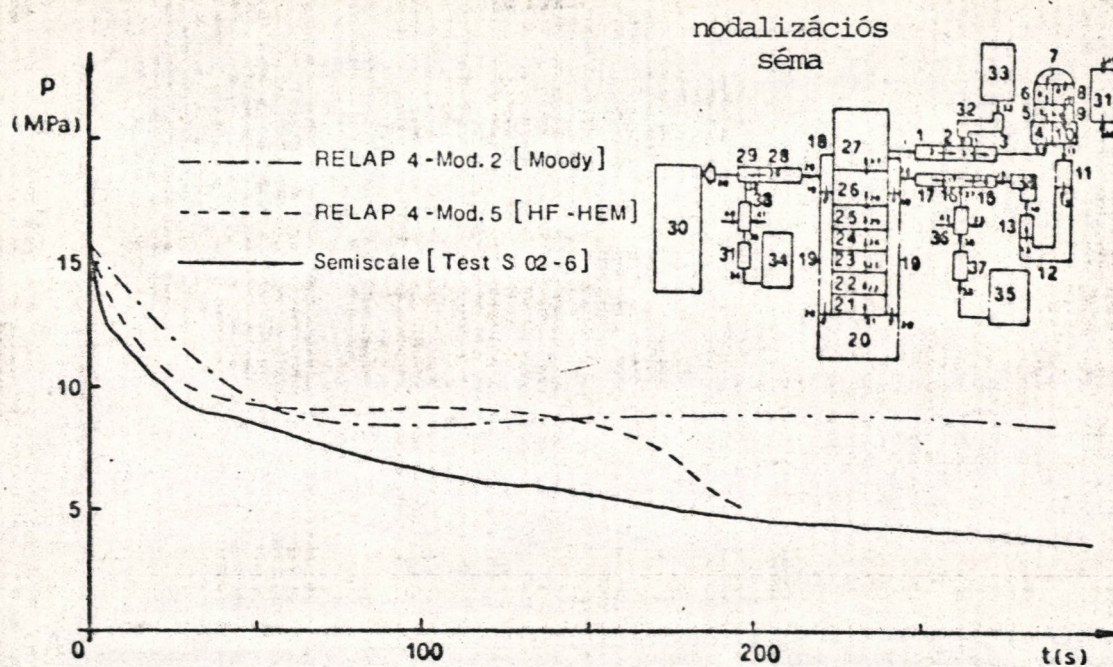
Különböző modellek összehasonlítása



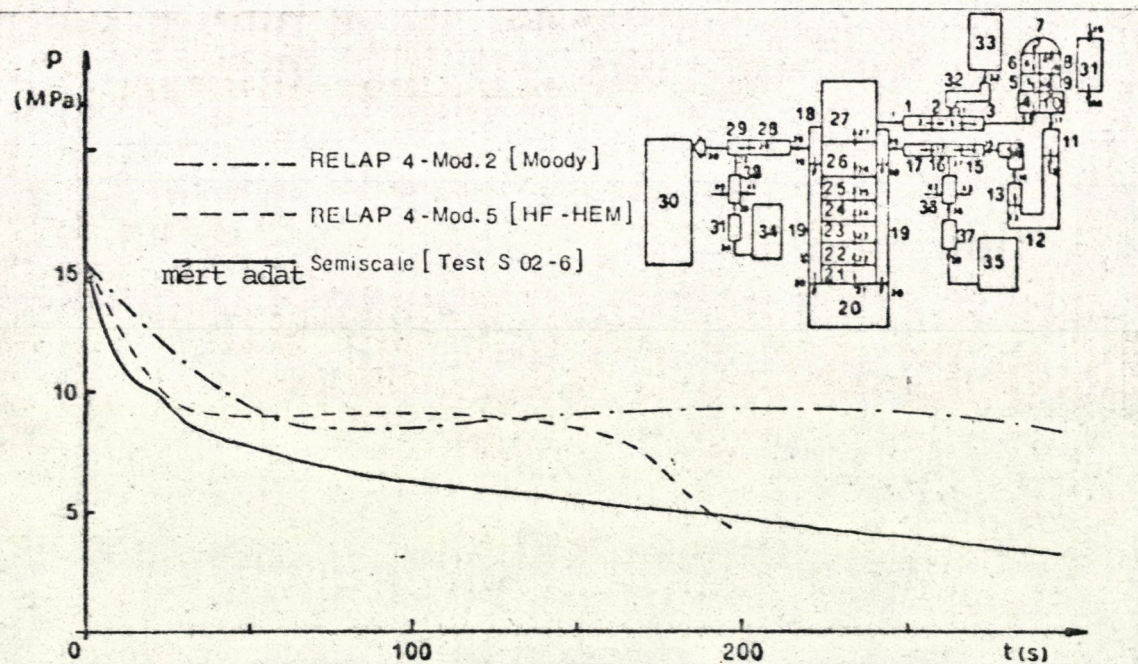
Tömegfluxus a törési keresztmetszetben



Átlagos sűrűség a 29. térfogatelemben

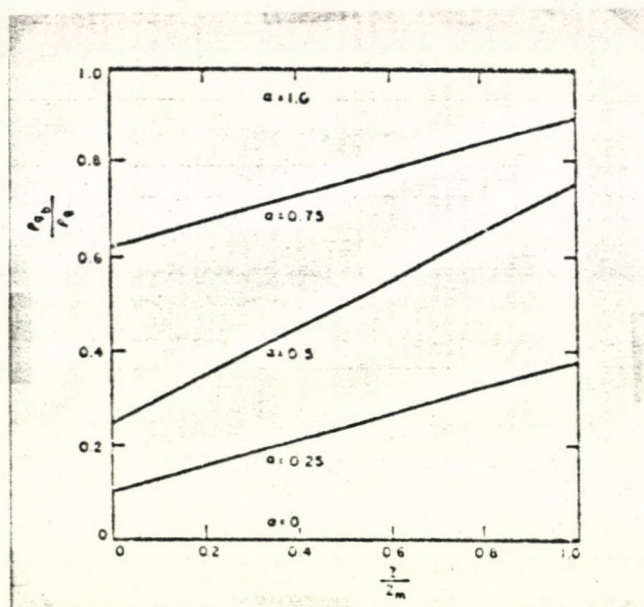


Felső keverőtér lefuvatás



Alsó keverőtér lefuvatás

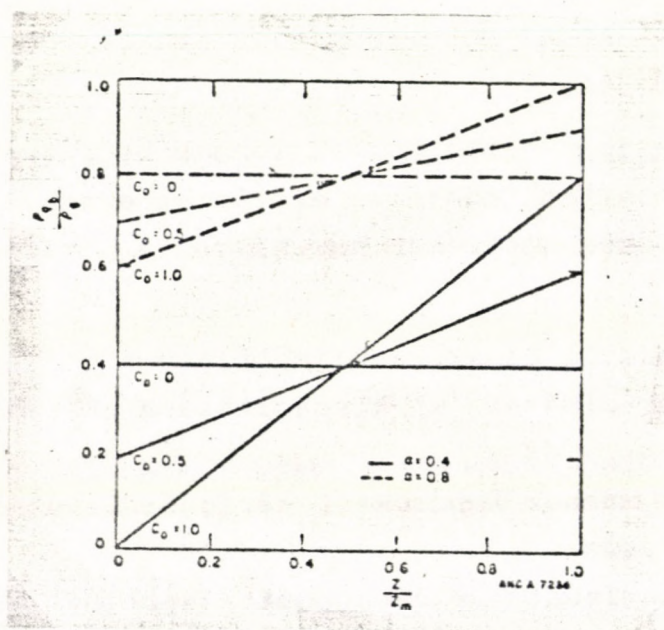
buborék
sűrűségi
hányados



magassági hányados

A térfogati gőztartalom hatása a buborék a buborék
sűrűségi gradiensre $C_0 = 0,5$ esetében

buborék
sűrűségi
hányados



magassági hányados

A C_0 hatása a buboréksűrűségi gradiensre $\alpha = 0,4$ és
 $\alpha = 0,8$ esetére

A folyadék és gőz szeparációjának számítási, modellezési lehetőségei homogén modell esetén.

Üzemzavari tranziensek modellezésénél sok esetben lényeges a gőz és folyadékfázis szeparálódásának számítása. Lényeges a vízszint meghatározása lefuvatás esetén a zónában, a hőcserélőben és a nyomástartóban, ezek megfelelő számítása, szimulálása fontos adatokat szolgáltat a biztonságos üzemeltetéshez.

Jelentős probléma viszont, hogy a reaktorbalesetek leírását szolgáló számítógépes programok jó része homogén modellre épül. Ilyenkor teljesen elkeveredett folyadék-gőz fázist kell feltételezni, s a számítási eredmények emiatt néha nagyon különböznek a valóságtól. Jelenleg Magyarországnak is csak olyan biztonsági programok állnak rendelkezésre, amelyek ilyen homogén modellen alapulnak. A fizikai-matematikai modell korlátai és a valóság leírásának követelménye egy kompromisszumos megoldást eredményezett, mely segítségével jobban lehet a primerköri szeparációs folyamatokat szimulálni.

A következőkben a RELAP 4/ MOD 6-ban alkalmazott buborékszeparációs modell kerül ismertetésre.

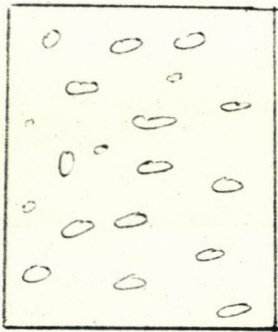
Ebben a programverzióban olyan opciók vannak beépítve, amely az áramlási képet azonosítani tudja, s ezután az ennek megfelelő áramlási és hőátadási összefüggéseket használja. A következő opciók használhatók:

- 1./ Gőzbuborék mozgás és eloszlás szimulálása a folyadékban
- 2./ A keverék gőztartalmának $/x/$ kiszámítása a hőátadási korrelációban
- 3./ Vertikálisan egymáshoz kapcsolódó térfogatelemek esetén a vízszint meghatározása
- 4./ Vertikális és horizontális csomópont $/junction$, érintkezési felület/ keresztmetszetének modellezése
- 5./ Összekapcsolt térfogatelemek ekvivalens szintjének számítása.

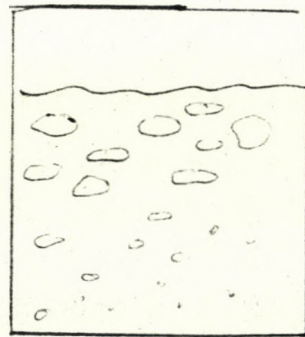
Ezeknek az alapeseteknek a kombinációjából, az összetett folyamatok szimulálására alkalmas modellt lehet összeállítani.

Általános modell leírás

A buborék-emelkedési modell. Ezzel a szeparációs modellel a keverék entalpiája és sűrűsége jobban leírható a vertikális helyzet függvényében. A következő ábrán szemléltethető, hogyan kezeli a modell a vertikális térfogatelemet:



homogén modell



buborékemelkedési
szeparációs modell

Az ábrán bemutatott modell esetén feltételezzük, hogy a buborékok eloszlásának sűrűsége a térfogatelem alján a legkisebb. Ennek leírása egy lineáris eloszlási modellel történik, melyet az elem magasságára normalizálunk.

$$\rho_{g,b} = a \frac{z}{z_m} + b \quad \text{II/1}$$

ahol $\rho_{g,b}$: a gőz porciális nyomása a buborékokban, az adott keverékre, a, b időfüggő együtthatók, melyeket tapasztalati, mérési úton korreláltak,

z a térfogatelem aljától mért távolság,

z_m a keverék felszínének időfüggő magassága.

A fenti II/1-es egyenlethez hasonlóan írhatjuk fel a keverék sűrűségét is:

$$\rho_{\text{mix}} = e \frac{z}{z_m} + f \quad \text{II/2}$$

ahol e és f időfüggő együtthatók.

Gőz kétféleképpen juttatható a térfogatelembe: egy csatlakozási ponton keresztül, vagy a nyomás lecsökkentésének következményeként, belső gőzkiválasztással /flashing/. A térfogatelem folyadék részében a gőz mennyisége a következő okok miatt változhat: elpárolgás, kiáramlás, átlépés a csak gőz tartalmazó részbe. Differenciálegyenletként felírva ez a következőképpen néz ki:

A folyadék részben levő gőz tömege:

$$\dot{M}_{g,b} = \dot{M}_s - \sum_i y_i X_i W_i - A v_{bub} (\rho_{g,b})_{z_m} \quad \text{II/3}$$

ahol $\dot{M}_{g,b}$ = A keverékben keletkezett gőzbuborékok tömege

\dot{M}_s = A térfogatelemben levő gőz tömege

y_i = A térfogatelemből ki- vagy beáramló gőz tömege, amely a gőzrészből ered vagy oda érkezik

X_i = Gőztartalom a csomópontnál

W_i = Az i-edik csomópontban történő ki-vagy beáramlás

A = A térfogatelem keresztmetszete

v_{bub} = A buborék sebessége a keverék felszínéhez /elválasztó-felületéhez/ viszonyítva

$(\rho_{g,b})_{z_m}$ = Buborék eloszlássűrűség a keverék felszínénél.

A II/1 és II/3 egyenlet megoldása adja a térfogatelemben keletkező gőz mennyiségét és eloszlását. A II/1-ben szereplő a és b együttható értékét a programban a következőképpen definiálták:

$$\left. \begin{aligned} a &= 2c_o \frac{M_{g,b}}{V_m} \\ b &= /1-c_o/ \frac{M_{g,b}}{V_m} \end{aligned} \right\} \text{ ha } 0 < \frac{M_{gb}}{g V_m} \leq 0,5$$

és

$$\left. \begin{aligned} a &= 2 c_o \left(\rho_g - \frac{M_{gb}}{V_m} \right) \\ b &= /1+c_o/ \frac{M_{gb}}{V_m} - c_o \rho_g \end{aligned} \right\} \text{ ha } 0,5 \leq \frac{M_{gb}}{g V_m} \leq 1,0$$

ahol ρ_g a gőzsűrűség és V_m a keverék térfogata a térfogatelemben, ahol a keverék a folyadékot + M_{gb} gőzbuborékokat tartalmazza.

Hasonló összefüggések használhatók a II/2-ben használt e és f együtthatókra is.

A c_0 együttható /melynek értéke 0 és 1 között változik/ fogja meghatározni

A II/1 és II/2-es ábra mutatja a c_0 és az átlagos térfogattört hatását a keverék buboréksűrűségi eloszlás gradiensére. Ha $c_0=0$, akkor a keverék homogén. Ha $c_0=1$, akkor a buboréksűrűség maximális, a következő megkötéssel:

$$\int_0^{Z_m} \rho_{g,b} dz = \frac{M_{g,b}}{A}$$

ahol $0 < \rho_{g,b} < \rho_g$ bármely vertikális pontban.

A RELAP4/MOD6 programban minden egyes térfogatelemnek lehet saját c_0 értéke, amit a felhasználó ad meg. Kis térfogatok és nagy tömegfluxusok esetén pl. a zóna fűtő csatornáinál vagy csöveknél teljes keresztmetszetű homogén modell adja a legjobb leírást. Tartályokban, keverőterekben, ahol szeparáció várható $0,8 < c_0 < 1,0$ javasolható.

A II/3 egyenletben szereplő V_{bub} /relatív sebesség/ is megadható minden egyes térfogatelemre. V_{bub} nagyságától függően a keverék szintje a térfogatelem felső része és a buborékmentes szint között lesz valahol. Ha $V_{bub}=0$, akkor nincs szeparálódás és a keverék szintje a térfogatelem magasságával lesz egyenlő. Ennek ellenére egy c_0 még mindig definiálható. Ha a térfogatelemen belül teljes szeparációt szeretnénk elérni, akkor $V_{bub} = 10^6$ értéket kell megadni. A V_{bub} tipikus értékei 0,5 és 3,0 között mozognak ha magas nyomáson lejátszódó dekomprimálást szimulálunk. Ennél magasabb buborék sebesség adható meg alacsony nyomásoknál.

Ha a tömegfluxus nagyobb, mint $2 \cdot 10^6$ font/óraft², akkor a buborék-emelkedési modell nem használható, homogén modell fog a helyére lépni.

A helyi gőztartalom számítása hőátadás modellezésére

A reaktorzónában a keverékszint megjelenése a hőátadási tényező ugrásszerű változását okozza. Ez a modell megpróbálja a hőátadás leírásának javítását a keverékszint környékén. A szilárd anyaggal való hőcsere számításnál a különböző korrelációknál az átlagos paramétereket használjuk, többek között az X átlagos gőztartalmat. Ebben az opcióban viszont minden egyes falra egy helyi X gőztartalmat számolunk a szeparációs modell segítségével. A gőztartalmat általában úgy határozzuk meg, hogy a teljes gőztömeg/teljes keveréktömeg. Egy olyan fal esetén, ahol a térfogatelem szeparálódott felszint tartalmaz, a buborékemelkedési modell alapján integrálunk a térfogatelem aljától a folyadékszintig, hogy a helyi gőztartalmat megkapjuk:

$$\bar{X}_{\text{helyi}} = \frac{\int_{Z \text{ alsó}}^{Z \text{ felső}} \rho_{g,b} dz}{\int_{Z \text{ alsó}}^{Z \text{ felső}} \rho_{\text{mix}} dz} A$$

ahol Z alsó a térfogatelemben levő fal alja, és

Z felső a térfogatelemben levő fal teteje.

Az eredmény általában egyszerűsíthető A végigosztásával. A keverékszint felett $\bar{X} = 1$ értéket tételezünk fel.

Mivel a hőátadási együttható függ a gőztartalomtól és az áramlási, hőátadási rezsimtől is, ezért lehetséges, hogy egymás mellett levő hőátadó felületeknek más-más hőátadási tényezője lesz azonos térfogatelem esetén is.

vertikálisan egymás felé helyezett térfogatelemekben a folyadékszint számítása

A buborékemelkedési modell nyugodtan használható egy térfogatelemben, hogy a keverék szeparációját számolhassuk. Ha ezt a modellt körültekintés nélkül, egymással vertikális kapcsolatban levő térfogatelemnél /pl. gőzfejlesztő/ használjuk, akkor irreális gőz-folyadék rétegződés alakulhat ki.

Ahhoz, hogy egyetlen folyadékszintet kapjunk és kiküszöböljük a rétegződést, a felhasználónak a következő dolgokat kell tenni:

- 1./ Meg kell keresni a programnak azt a részét, amely az IAMBOLO input adatot használja a térfogatelemek adatai közül.
- 2./ A vertikálisan egymás felett elhelyezkedő térfogatelemek érintkezési felületeire egy vertikális slip értéket kell definiálni, az SCROS > 0 érték megadásával a junction adatkártyákon.
- 3./ A buborékokra vonatkozó adatkártyán egy $V_{bub} > 0$ értéket kell megadni a vertikális térfogatelemek mindegyikére. Továbbá az ALPH változó értékét 0-ra kell megadni az érintett vertikális térfogatelemekre.

Ha a fenti eljárást követjük, akkor a program az egymás felett lévő térfogatelemek közül, a legfelsőben számolja a szintet, s alatta homogén eloszlást ad.

Általában az IAMBOLO értékét akkor definiáljuk, ha kis inerciájú, lassu tranzienst számolunk és az áramlási keresztmetszetek azonosak. Nem szabad használni viszont ha nagy áramlási keresztmetszet változások vannak, pl. a gyűrükamra és alsó keverőtér között, vagy ha homogenizáló hatású szűk nyíláson áramlik át a keverék. Az előbbi esetben s slip modell és buborékemelkedési modell használható.

A csomópont /junction/ opció használata

Egy csomópontban a termodinamikai tulajdonságokat úgy számoljuk, hogy a csomópontot egy adott magasságu pontként kezeljük. Ez igaz a vertikális térfogatelemekre mindenkor.

A horizontális csomópontokat úgy modellezzük, hogy vertikálisan elosztott felületű körlapot veszünk. Ha a junction adatkártyáknál JVERTL értékére 0-t adunk meg, akkor a buborékeloszlást tekintve a csomópont egy pontként tekinthető, és a jellemzők a csomópontban "simitottak" lesznek. Ha JVERTL = 1, akkor a csomópont /érintkezési felület/ kör alakúnak van tekintve, és az átmérője vertikális. Ha JVERTL viszont 2, akkor az érintkezési felületet egyetlen vertikális pontba koncentrálnak, és a jellemzők ott nem lesznek "simitottak".

A csomóponti paraméterek /sűrűség, gőztartalom, entalpia/ simítása /JVERTL=0-nál/ csak akkor alkalmazható, ha megengedjük a gőzsze-parációt, és a felszín a csomópont közelében van.

A fenti esetben, s mikor a csomópont a gőztérben van, az egy idő-lépés alatt kiáramlott gőztömeget $W_i \Delta t$ úgy kezeljük, hogy abból a térfogataból áramlik ki a gőz, amely ZJUN és a folyadékfelszín között van. Ha a szükséges gőzmennyiség meghaladja azt az értéket, ami ebben a térfogatban található, akkor a többletet a keverékből vesszük el inkább, s nem a gőznyomás túlzott csökkentésével a gőz-térből. Ez a modell feltételezi, hogy a folyadékszint egy időlépés alatt ilyenkor a csomópontig emelkedik. Így ez a modell állandó térfogatfluxus fenntartására törekszik, így ellensúlyozza a felszín változása miatti sűrűségváltozásokat.

JVERTL=2 használata esetén a csomópont tulajdonságait /sűrűség, se-besség, entalpia/ az éppen ott levő fázis tulajdonságai határozzák meg. Mivel ennél az opciónál nincs "simítás", a tiszta gőz és tiszta folyadék között oszcilláló mozgás jöhet létre, ami fokozott gépidő-igénnyel jár.

Folyadékszint számítása

A RELAP4-ben lehetőség van max. 20 térfogatelemből álló részegység ekvivalens folyadékszintjének számítására. Ezek sorrendje tetsző-leges, de az első ilymódon megadott térfogatelem lesz a referencia-elem. A teljes folyadéktömeg a részek folyadéktartalmának összes-ségéből adódik. A teljes folyadéktérfogatot úgy kapjuk, hogy a tel-jes tömeget osztjuk a referencia térfogatelem folyadéksűrűségével. A folyadékszintet a referencia térfogatelem aljától számítjuk, ez kerül kinyomtatásra minden edit alkalmával. Ez az opció különösen hasznos a zónaelárasztás kezdetének meghatározásakor.

TARTALOMJEGYZÉK

Oldal

I. RÉSZ

1. Bevezetés	1
2. Reaktorbalesetek áramlási problémái	2
3. A főbb kritikus kiömlési modellek táblázatos ismertetése	3
4. Termodinamikai egyensúlyon alapuló modellek	8
5. Nemegyensúlyi modellek	8
6. A RELAP4-ben felhasznált modellek	9
7. Sonic modell	10
8. Moody modell	10
9. Henry Fauske modell	11
10. Homogén Egyensúlyi Modell	11
11. A modellek kvalitatív összehasonlítása	12
12. A modellek kvantitatív összehasonlítása	13
14. Néhány szerző megjegyzése a modell használhatóságáról	14
15. Összefoglalás, ábrák	15

II. RÉSZ

1. A folyadék és gőz szeparációjának számítási, modellezési lehetőségei homogén modell esetén	26
2. Általános modell leírása	27
3. A helyi gőztartalom számítása a hőátadás modellezésére	30
4. Vertikálisan egymás fölé helyezett térfogatelemekben a folyadékszint számítása	30
5. A csomópont /junction/ opció használata	31
6. Folyadékszint számítása	32
7. Tartalomjegyzék	33

63.482



Kiadja a Központi Fizikai Kutató Intézet
Felelős kiadó: Gyimesi Zoltán
Szakmai lektor: Szabados László
Példányszám: 55 Törzsszám: 84-58
Készült a KFKI sokszorosító üzemében
Felelős vezető: Nagy Károly
Budapest, 1984. január hó